Elektronenbefreiung durch energiearme Ionen in Gasen und an Oberflächen

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg
(Kurzfassung)

Vorgelegt von
Diplom-Physiker
Arnulf Diener
aus Rothenfels/Main

Würzburg 1956

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Tag der mündl. Prüfung:
1 März. 1967.

Handelsdruckerei

1. Problemstellung

Die Gesetze der Zündung von elektrischen Gasentladungen können in ihren Grundzügen sehr gut durch die Townsend'sche Theorie erklärt werden. Diese Theorie basiert auf zwei Grundlagen:

1. Durch äußere Ursachen in einem Gas gebildete Elektronen erzeugen unter dem Einfluß eines genügend großen elektrischen Feldes durch Stoß neue Trägerpaare, so daß eine exponentielle Erhöhung des Primärelektronenstromes längs des Laufweges der Elektronen erfolgt.

2. Durch diesen Vorgang bedingte Sekundäreffekte sind die Ursache einer weiteren Elektronenerzeugung. Diese wird in der Literatur als Nachlieferung bezeichnet.

Werden durch die Nachlieferung genauso viel Elektronen erzeugt als ursprünglich im Gasvolumen vorhanden waren, so wird die Entladung selbständig. Als einzigen Nachlieferungseffekt hat Townsend die Stoßionisation der durch die Elektronenstöße erzeugten Ionen angenommen. Experimentelle Untersuchungen zeigten, daß außerdem noch folgende Effekte beteiligt sind:

Die Befreiung von Elektronen durch Ionenstoß und durch in der Entladung erzeugte Photonen an Oberflächen und Ionisation von Atomen bzw. Molekülen durch Photonen im Gasvolumen.

Diese vier Effekte rufen die gleiche Wirkung hervor. Die experimentelle Untersuchung der Einzeleffekte bereitet daher überaus große Schwierigkeiten. Die älteren Messungen sind aus diesem Grunde zum größten Teil nicht frei von Fehlern. Aus theoretischen Gründen wurde die Wirksamkeit der Stoßionisation durch Ionen im Gasvolumen vielfach abgestritten.
Ziel dieser Arbeit war es, die Elektronenbefreiung durch Ionen in Gasen und an Oberflächen unter den Bedingungen, wie sie in elektrischen Gasentladungen vorkommen, zu untersuchen.

2. Das Meßprinzip

Die zur Messung benötigten Ionen werden in einer Koronaentladung zwischen einer Drahtanode und einer zylindrischen Kathode erzeugt. Öffnungen in der Kathode ermöglichen einem Teil der Ionen den Eintritt

in den Meßraum. Hier werden sie auf eine gegen die Kathode negative, zylindrische Elektrode gesaugt (Absaugeelektrode). Die an deren Oberfläche oder im Gasvolumen erzeugten Elektronen werden von Elektroden geeigneter Form und Anordnung gesammelt (Meßelektroden).

Gemessen werden der Ionenstrom an der Absaugelektrode und der Elektronenstrom an den Meßelektroden als Funktion von E i/p (E i: Elektrische Feldstärke an der Oberfläche der Absaugelektrode; p: Druck im Meßgefäß) bei konstantem Druck. E i/p ist proportional der mittleren kinetischen Energie der Ionen. Eine inhomogene Anordnung mußte gewählt werden, weil bei einer homogenen schon bei sehr kleinen E i/p-Werten Zündung zwischen der Absaugelektrode und den Meßinstrumenten eintritt. Zur Erleichterung der Auswertung der Meßergebnisse wurde der Aufbau so gestaltet, daß das elektrische Feld im Meßraum annähernd dem exakten Zylinderfeld entsprach.

Durch die Ioneneintrittsöffnungen trat unvermeidbar U.V.-Licht aus den Koronaentladungen in den Meßraum und erzeugte hier Störelektronen. Diese müssen durch ein geeignetes Meßverfahren ermittelt und aus dem Meßstrom eliminiert werden.

Eine genauere Betrachtung zeigt, daß die Division des gemessenen Elektronenstromes durch den gemessenen Ionenstrom die Elektronenausbeute ergibt. Der Elektronenstrom ist allerdings noch durch die Elektronenstoßionisation verfälscht und muß entsprechend korrigiert werden.

3. Die erste Meßapparatur

Die Untersuchungen zeigten, daß das Ziel der Arbeit nur durch die Benutzung zwei sich ergänzender Meßapparaturen zu erreichen war.

Bei der ersten Meßapparatur werden die Ionen in acht konzentrisch um den Meßraum angeordneten Entladungsrohren erzeugt. Schlitze in den Kathoden gestatten ihnen den Eintritt in den Meßraum. Die Absaugelektrode ist in der Mitte der Gesamtanordnung, die Meßelektroden in geeigneter Weise konzentrisch um diese angeordnet.

Die Photostörströme können bei dieser Apparatur dadurch ermittelt werden, daß man durch eine geeignete Spannung an den Meßelektroden bei sonst gegenüber den eigentlichen Messungen unveränderten Bedingungen den Ionen den Eintritt in den Meßraum verwehrt.

Der Vorteil dieser Apparatur besteht darin, daß sämtliche durch Ionen erzeugten Elektronen erfaßt werden können. Als Nachteil erwies sich die relativ geringe Zündspannung zwischen der Absaugelektrode und den Meßelektroden. Die Messungen konnten aus diesem Grunde nur bis zu sehr geringen E i/p-Werten ausgedehnt werden. Zur Auswertung der Meß-

ergebnisse ist es nötig, daß die Photoströme mindestens eine Größenordnung kleiner sind als die eigentlichen Meßströme. Dies war bei dieser Apparatur nur beim Stickstoff der Fall. — Sehr störend wirkte sich die Tatsache aus, daß bei kleinen Drucken die Koronaentladungen in den acht Entladungsrohren sehr leicht in unregelmäßig und fadenförmig brennende Durchschläge übergingen.

4. Die zweite Meßapparatur

Bei der zweiten Meßapparatur werden die Ionen nur in einem Entladungsrohr erzeugt. Dieses wird vom Meßraum konzentrisch umgeben. In diesem sind in geringem Abstand von der Kathode zwölf Absaugelektroden befestigt. Die Meßelektrode umgibt diese wiederum konzentrisch. Ein großer Nachteil dieser Anordnung ist die Tatsache, daß nur ein Teil der erzeugten Elektronen zur Meßelektrode gelangt. Der andere Teil fließt zur Kathode zurück. Ein Vorteil ist, daß hier Störungen durch Überschläge fast vollkommen wegfallen. Weiter ist der Einfluß der Photoströme weitaus geringer als bei der ersten Apparatur. Zündung zwischen den Absaugelektroden und der Meßelektrode tritt bei verhältnismäßig hoher Spannung ein, so daß die Messungen bis zu weitaus höheren E i/p-Werten als bei der ersten Apparatur ausgedehnt werden konnten.

5. Der Einfluß der Raumladung auf die Meßergebnisse

Wegen ihrer geringen Beweglichkeit bewirken die Ionen durch ihre Raumladung eine Veränderung des elektrischen Feldes im Meßraum, und zwar in unserem Falle eine Verstärkung in der Nähe der Absaugelektroden, eine Abschwächung in der Nähe der Ioneneintrittsöffnungen. Einen Einfluß auf die Meßergebnisse kann nur die Verstärkung in der Nähe der Absaugelektroden ausüben. Die Raumladungswirkung wird stärker mit wachsendem Ionenstrom. Da sich die Ausbeuten jedoch von diesem unabhängig zeigten, kann die Raumladungsverfälschung vernachlässigt werden.

6. Die Meßergebnisse mit der ersten Apparatur

a) Im Stickstoff

Die Ausbeuten wurden bei verschiedenen Drucken in einem Bereich von 7 bis 25 Torr ermittelt. Es ergab sich ein verschiedenartiger Verlauf je nach der Oberflächenbeschaffenheit der Kupferabsaugelektrode:

1. Bei einer reinen Kupferoberfläche (erzeugt durch Ausheizen der Apparatur in einer Wasserstoffatmosphäre von 50 Torr auf 350° C) liegt die

Ausbeute in der Größenordnung von ungefähr 10^{-1}. Sie ist schwach abhängig von E_i/p, völlig unabhängig jedoch vom Druck. Die Messungen konnten bis zu E_i/p-Werten von 200 $\frac{\text{Volt}}{\text{Torr. cm}}$ durchgeführt werden.

2. Bei einer oxydierten Oberfläche (erzeugt durch Ausheizen der Apparatur in einer Sauerstoffatmosphäre von 10 Torr auf 200° C) liegt die Ausbeute ungefähr eine Größenordnung tiefer. Der qualitative Verlauf gleicht der bei einer reinen Oberfläche.
3. Ist die Absaugelektrode mit einer H_2O-Schicht bedeckt, so zeigt die Ausbeute einen ganz anderen Verlauf: Die Messungen konnten in diesem Falle bis zu E_i/p-Werten von 350 $\frac{\text{Volt}}{\text{Torr. cm}}$ ausgedehnt werden. Bis zu einem E_i/p-Wert von 150 $\frac{\text{Volt}}{\text{Torr. cm}}$ ist die Ausbeute auch hier nur schwach E_i/p- und nicht druckabhängig. Sie liegt in der Größenordnung von 10^{-4}. Bei höheren E_i/p-Werten wächst die Ausbeute ungefähr exponentiell mit E_i/p. Ferner zeigt sich eine starke Druckabhängigkeit.

7. Die Meßergebnisse der zweiten Apparatur

a) Im Stickstoff

Mit der zweiten Apparatur konnten die Ausbeuten bis zu E_i/p-Werten von fast 500 $\frac{\text{Volt}}{\text{Torr. cm}}$ ermittelt werden. Der Verlauf gleicht dem mit der ersten Apparatur gefundenen, jedoch sind die Absolutwerte der Ausbeuten ungefähr um den Faktor 10 kleiner. Das heißt, daß in dieser Apparatur nur $^1/_{10}$ der durch Ionen erzeugten Elektronen erfaßt werden. Die druckunabhängigen Ausbeuten zeigen auch hier wieder bei kleinen E_i/p-Werten ein Anwachsen mit E_i/p; bei größeren sind sie jedoch E_i/p-unabhängig. Mit dieser Apparatur konnte auch die Abhängigkeit der Ausbeuten vom Radius der Absaugelektroden untersucht werden. Diese stimmt qualitativ und quantitativ mit der Druckabhängigkeit überein.

b) Im Wasserstoff

Im Wasserstoff wurden nur E_i/p-, druck- und radiusabhängige Ausbeuten gefunden. Bei den Messungen im Wasserstoff mußte auf eine extreme Reinhaltung des Meßgefäßes von Kohlenwasserstoffdämpfen geachtet werden. Schon beim Vorhandensein geringster Spuren von Kohlenwasserstoffdämpfen sanken die Ausbeuten beim Brennen einer Entladung im Laufe der Zeit ab.

c) In anderen Gasen

Die Durchführung der Messungen wurde auch in Sauerstoff und Argon versucht. Im Sauerstoff machte jedoch eine starke Photoionisation in Gase, im Argon die Photoelektronenbefreiung an Oberflächen und Unsicherheiten in den Elektronenverstärkungsfaktoren eine zuverlässige Auswertung der Meßergebnisse unmöglich.

Es können daher für beide Gase nur grobe Abschätzungen gemacht werden: Das Verhalten des Sauerstoffes ähnelt dem des Wasserstoffes, jedoch dürften die Ausbeuten ungefähr zwei Größenordnungen tiefer liegen. Die Ausbeuten im Argon ähneln sowohl qualitativ als auch quantitativ denen im Stickstoff.

8. Deutung der Meßergebnisse

a) Die druck- und radiusunabhängigen Ausbeuten

Die druck- und radiusunabhängigen Ausbeuten sind sicherlich durch eine Elektronenauslösung an der Oberfläche der Absaugelektroden bedingt. Neuere Untersuchungen mit Ionenstrahlen zeigen, daß die Elektronenbefreiung an Oberflächen durch die potentielle Energie der Ionen verursacht wird. Die Unabhängigkeit von E_i/p bei größeren E_i/p-Werten stimmt mit diesem Befund überein. Ein Abfall bei kleineren E_i/p-Werten ist wegen des Einflusses der Rückdiffusion zu erwarten.

b) Die druck- und radiusabhängigen Ausbeuten

Die druck- und radiusabhängigen Ausbeuten lassen sich nur durch eine Wirksamkeit der Ionen im Gasvolumen erklären. Eine solche wurde aber bisher vielfach abgestritten. Der Grund hierfür war die aus früheren experimentellen Untersuchungen geschlossene hohe Einsatzenergie für die Stoßionisation durch Ionen. Die widersprechenden Ergebnisse verschiedener dieser Arbeiten machen jedoch Fehler sehr wahrscheinlich. Bisher wurde auch nur die Ionisation durch einen direkten Ionenstoß diskutiert. Da jedoch bei den Versuchsbedingungen dieser Arbeit der Umladewirkungsquerschnitt in derselben Größenordnung liegt wie der Gesamtwirkungsquerschnitt, ist eine Ionisation durch stoßende neutrale Teilchen sehr wahrscheinlich. Diese tritt aber bei geringeren kinetischen Energien der stoßenden Teilchen ein als eine Ionisation durch geladene Teilchen. Die gemessenen Ausbeutekurven zeigen in ihrer E_i/p-, Druck- und Radiusabhängigkeit qualitativ den theoretisch zu erwartenden Verlauf.